

Konzeptionelle Planungen und Entwicklungsarbeiten zur Wasserstoff- Wirtschaft

Brennecke, Peter

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 37, 1985,
S.67-87



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

Konzeptionelle Planungen und Entwicklungsarbeiten zur Wasserstoff-Wirtschaft

Von **Peter Brennecke**, Braunschweig*)

Vorgelegt von Dieter Kind

(Eingegangen am 22. 8. 1985)

1. Einleitung

Bei einer Betrachtung des globalen Energieverbrauchs zeigen die Wachstumsraten während der letzten Jahrzehnte eine exponentielle Zunahme. Nach Abb. 1 beläuft sich in der letzten Zeit der weltweite Anstieg des Energieverbrauchs auf etwa 5% pro Jahr. Heutige Vorstellungen über die zukünftige Entwicklung des Weltenergiebedarfs vermitteln die Ergebnisse der 12. Weltenergiekonferenz in Neu-Dehli 1983. Aufgrund der wachsenden Weltbevölkerung, des Nachholbedarfs der Entwicklungsländer und des Wirtschaftswachstums der Industrieländer wird ein anhaltender Anstieg des Primärenergiebedarfs prognostiziert. Vom derzeitigen Verbrauch von etwa $10 \cdot 10^9$ t SKE dürfte er bis auf $20-25 \cdot 10^9$ t SKE im Jahr 2020 anwachsen, wobei bereits erhebliche Energieeinsparungen in allen Bereichen unterstellt worden sind.

Da die vorhandenen Reserven (gesicherte Lagerstätten, die mit der heute verfügbaren Technologie unter den gegebenen wirtschaftlichen Voraussetzungen ausgebeutet werden können) und Ressourcen (Reserven und gesicherte Lagerstätten, die derzeit infolge wirtschaftlicher oder technologischer Beschränkungen nicht abgebaut werden können, sowie bis jetzt noch nicht entdeckte Lagerstätten) jedoch nicht unendlich groß sind, kann die zukünftige Versorgung bei unveränderten Energieverbrauchsstrukturen und -raten als nicht gesichert angesehen werden. Die Endlichkeit der Vorräte führt damit auf die in Zukunft zu erwartende Erschöpfung von Erdgas, Erdöl, Kohle und Uran. Aus diesem Sachverhalt resultiert die energiepolitische Notwendigkeit, diese Primärenergieträger zu substituieren und somit zwangsläufig auf regenerative bzw. praktisch unerschöpfliche Energiequellen überzugehen. Als regenerative Energiequelle ist die Sonnenenergie zu nennen, zu den praktisch unerschöpflichen Energiequellen zählen die im Brutreaktor ablaufende Kernspaltung und die Kernfusion. Für eine großtechnische Lösung der langfristigen Energieversorgung scheinen daher die folgenden drei Möglichkeiten vorrangig in Betracht zu kommen: der Brutreaktor, der Fusionsreaktor und das Sonnenkraftwerk.

Die genannten drei Zukunftsmöglichkeiten weisen die Besonderheit vergleichsweise geringer laufender Kosten, jedoch sehr hoher Investitionskosten auf. Da die

*) Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, D-3300 Braunschweig

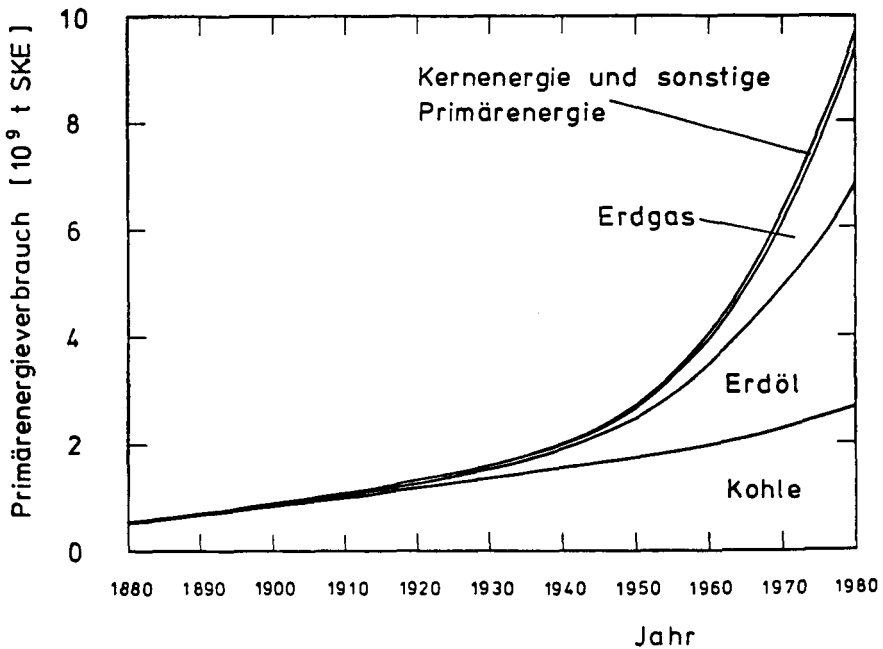


Abb. 1:

Schematische Darstellung der Entwicklung des Weltenergieverbrauchs von 1880 bis 1980.

Brennstoffvorräte für diese Systeme praktisch unerschöpflich sind, wird ihr etwaiger zukünftiger Einsatz nur durch das Kapital begrenzt, das zu ihrem Ausbau zur Verfügung gestellt werden kann [1]. Bei einem solchen Übergang werden die bisherigen Primärenergieträger gewissermaßen durch das Kapital ersetzt, das man in die Nutzung der unerschöpflichen Energiequellen investiert. In diesem Zusammenhang wird auch von einem Übergang zu einer investiven Nutzung von Energieressourcen gesprochen [2,3].

Fragen der zukünftigen Energieversorgung der Menschheit haben EDUARD JUSTI bereits seit Jahrzehnten beschäftigt [4–8]. Im Rahmen dieser Arbeiten, die bis zur Mitte der fünfziger Jahre zurückreichen, entwickelte er das Konzept einer Sonnen-Wasserstoff-Wirtschaft, in der Wasserstoff als zentraler Sekundärenergieträger und Rohstoff dient [9–17]. Über konzeptionelle Überlegungen und experimentelle Untersuchungen zur Sonnen-Wasserstoff-Wirtschaft, die am Institut für Technische Physik der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt wurden, soll nachfolgend anhand einiger ausgewählter Beispiele berichtet werden.

2. Grundlegende Aspekte der Wasserstoff-Wirtschaft

Von der Sonne wird der Erde jährlich eine Energie von rund 10^{18} kWh ($\triangleq 1,2 \cdot 10^{14}$ t SKE) zugestrahlt, von der jedoch nur ein Teil die Erdoberfläche erreicht.

Die wesentlichen Probleme bei der terrestrischen Sonnenenergienutzung liegen in der geringen Energiedichte der Sonnenstrahlung wie auch in der tages- und jahreszeitlichen Verteilung der zugestrahlten Energie. Die auf der Erdoberfläche maximal verfügbare Leistung kann zwar bis zu 1 kW/m^2 betragen, im Mittel ergeben sich jedoch sehr viel geringere Leistungen. Für eine Nutzung im großtechnischen Maßstab ist ferner die insgesamt pro Jahr zugestrahlte Energie von Bedeutung. In der Bundesrepublik beläuft sich die jährlich zugestrahlte Energie auf etwa 1000 kWh/m^2 [18]; dieser Wert ist beispielsweise in Südeuropa bzw. Nordafrika doppelt bis dreifach so groß.

Aus der geringen Energiedichte der Sonnenstrahlung läßt sich folgern, daß die technische Nutzung der Sonnenenergie nur mit großflächigen Anlagen im Bereich südlicher Breitengrade aussichtsreich ist. Die zeitliche Verteilung der Sonnenstrahlung bedingt geeignete Speichermethoden und -einrichtungen, ohne die – insgesamt betrachtet – eine effiziente Nutzung der Sonnenenergie nicht gegeben sein kann.

Aus diesen grundsätzlichen Schwierigkeiten läßt sich unmittelbar die Schlußfolgerung ziehen, daß die Nutzung der Sonnenenergie für die zukünftige Deckung des Energiebedarfs der Menschheit nur dann möglich sein wird, wenn die zugestrahlte Energie in einen geeigneten Sekundärenergieträger umgewandelt werden kann. Ein solcher Sekundärenergieträger muß dabei sehr verschiedenen Anforderungen genügen. Zu seinen wichtigsten Eigenschaften zählt, daß

- die Umwandlung von Primär- in Sekundärenergie ohne großen technischen Aufwand mit hohem Wirkungsgrad möglich sein muß;
- er speicherbar, ohne größere Verluste über weite Strecken transportierbar und in den Verbrauchszentren leicht verteilbar sein muß;
- er entweder direkt verwendbar sein oder sich leicht in andere, jeweils benötigte Energieformen umwandeln lassen muß.

Von allen Optionen, die für einen solchen Sekundärenergieträger diskutiert und untersucht werden, stellt nach heutigem Kenntnisstand Wasserstoff die günstigste Lösung dar. Für eine zukünftige Verwendung von gasförmigem Wasserstoff als Sekundärenergieträger sprechen insbesondere die Vorteile, daß die technischen Voraussetzungen für seine Herstellung, seinen Transport, seine Speicherung und Nutzung bereits überwiegend bekannt und erprobt sind. Von entscheidender Bedeutung ist es, daß Wasserstoff mit anderen Energieträgern auf vorteilhafte Weise verknüpft werden kann, d.h. in allen zukünftigen Energieversorgungsstrukturen begünstigt Wasserstoff die Umstellung auf nichtfossile Primärenergieträger bzw. deren Nutzung und ermöglicht auf der Sekundärenergieseite einen kontinuierlichen Übergang zwischen verschiedenen gasförmigen Energieträgern.

Im einzelnen bietet der Einsatz von Wasserstoff als Sekundärenergieträger die folgenden Vorteile [19, 20]:

- Wasserstoff ist mit anderen gasförmigen Energieträgern kompatibel und erlaubt einen kontinuierlichen Übergang von Erdgas über synthetisch hergestellte Gase (Kohlevergasung) zu Wasserstoff. Die bestehende Gasinfrastruktur dürfte sicherlich z.T. genutzt werden können.

- Wasserstoff benötigt für Herstellung, Speicherung, Transport, Verteilung und Nutzung nur in ganz speziellen Fällen die Einführung grundsätzlich neuer Technologien. In vielen Fällen dürfte es sich um die Verbesserung bzw. Modifizierung von bereits genutzten Verfahren handeln.
- Wasserstoff kann mit anderen Energieträgern (Strom, Fernwärme, synthetische Kohlenwasserstoffe) gekoppelt werden. Insbesondere mit Strom kann ein enger Verbund für Ausgleichs- und Speicherzwecke durchgeführt werden.
- In Analogie zur inländischen Förderung und zum Import von Erdgas können sowohl inländische Primärenergiepotentiale (Kernenergie) als auch von Verbrauchsschwerpunkten weit entfernte Primärenergiepotentiale (Sonnenenergie, Kernenergie) genutzt werden. Für letztere stellt Wasserstoff praktisch den einzig einsetzbaren Sekundärenergieträger dar.

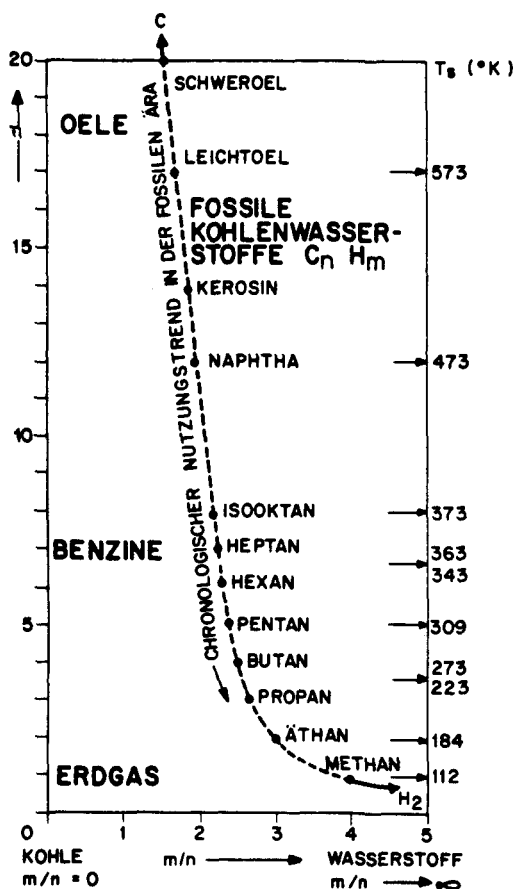


Abb. 2:

Geschichtlicher Trend in der Nutzung der Kohlenwasserstoffe (nach SEIFRITZ [21]).

- Durch Wasserstoff wird die Sonnenenergie im großen Maßstab für Industrieländer nutzbar, da er die eingestrahelte Energie „verdichtet“ sowie speicherbar, transportierbar und verteilbar macht.
- Die ökologischen Vorteile einer Wasserstoff-Wirtschaft werden vor dem Hintergrund von verschärften Umweltschutzbestimmungen in Zukunft immer mehr an Bedeutung gewinnen.
- Gegenüber Erdgas und Erdöl erhöht sich die Anzahl möglicher Standorte und das Potential der Primärenergiequellen. Damit dürfte sich die Verteilung von begrenzt vorhandener Energie entspannen und die Abhängigkeit von Lieferrestriktionen verringern.
- Schließlich ist Wasserstoff universell nutzbar und ein in zahlreichen großtechnisch-chemischen Verfahren seit Jahrzehnten eingesetzter Rohstoff.

Unter Berücksichtigung dieser Vorteile genügt Wasserstoff offenbar allen Bedingungen, die heute an einen zukünftigen Sekundärenergieträger zu stellen sind. Mit seiner Verwendung dürfte auch der logische Schlußpunkt in der Entwicklung der Kohlenwasserstoffära gesetzt werden [21]. Wenn die wichtigsten Kohlenwasserstoffe (C_nH_m) in einem Schema dargestellt werden, in dem die Zahl der Kohlenstoffatome n gegen das Verhältnis von Wasserstoff- zu Kohlenstoffatomen m/n aufgetragen ist, ergibt sich das in Abb. 2 wiedergegebene Bild. Die Geschichte der Ära fossiler Energieträger begann mit der Nutzung der Kohle ($m/n = 0$) und setzte sich über Erdöl ($m/n = 1,5$ bis $2,5$) und Erdgas ($m/n = 4$) fort. Der Siedepunkt der verwendeten Kohlenwasserstoffe sank dabei in charakteristischer Weise und kontinuierlich zu niedrigeren Temperaturen. Der Übergang zu Wasserstoff ($m/n = \infty$) wäre das logische Ende dieser Entwicklung.

3. Konzept der Sonnen-Wasserstoff-Wirtschaft

Im Rahmen der Sonnen-Wasserstoff-Wirtschaft wird angestrebt, die Sonnenenergie im großtechnischen Maßstab zu nutzen und damit das Potential dieser regenerativen Energiequelle zu erschließen. Die ersten Vorstellungen zu diesem Konzept hatte JUSTI Ende der fünfziger Jahre / Anfang der sechziger Jahre entwickelt und 1965 veröffentlicht [9]. In Weiterführung dieser ersten Arbeiten konzentrierte sich JUSTI auf eine quantitative Durcharbeitung und behandelte gemeinsam mit der Fa. Messer-Griesheim GmbH die sich bei einer Dimensionierung der H_2 - und O_2 -Pipelines ergebenden Fragestellungen [7].

Das 1965 veröffentlichte Blockdiagramm der Sonnen-Wasserstoff-Wirtschaft zeigt bereits alle grundsätzlich wichtigen Komponenten einer derartigen Energieversorgungsstruktur: Die von der Sonne eingestrahelte Energie wird mit Hilfe von Sonnenkraftwerken in Strom umgewandelt, der in Hochdruckelektrolyseure zur Zersetzung von Wasser eingespeist wird. Die Elektrolysegase Wasserstoff und Sauerstoff werden in Pipelines bis zu den Verbrauchszentren geleitet, was bedeutend günstiger als der Langstreckentransport von elektrischer Energie ist. Hier werden sie entweder in elektrische

Energie zurücküberführt oder als Rohstoff der chemischen Großindustrie direkt zur Verfügung gestellt.

Aus beiden Arbeiten [7, 9] ist erkennbar, daß JUSTI den Begriff der Sonnen-Wasserstoff-Wirtschaft weit gefaßt hat. Die Anwendungs- und Einsatzmöglichkeiten des Sekundärenergieträgers Wasserstoff wurden nicht eingeschränkt. Es wurde vielmehr das Ziel verfolgt, die gesamte Energieversorgung möglichst nur auf Wasserstoff abzustellen, der darüberhinaus z. B. auch als universeller Rohstoff für die unterschied-

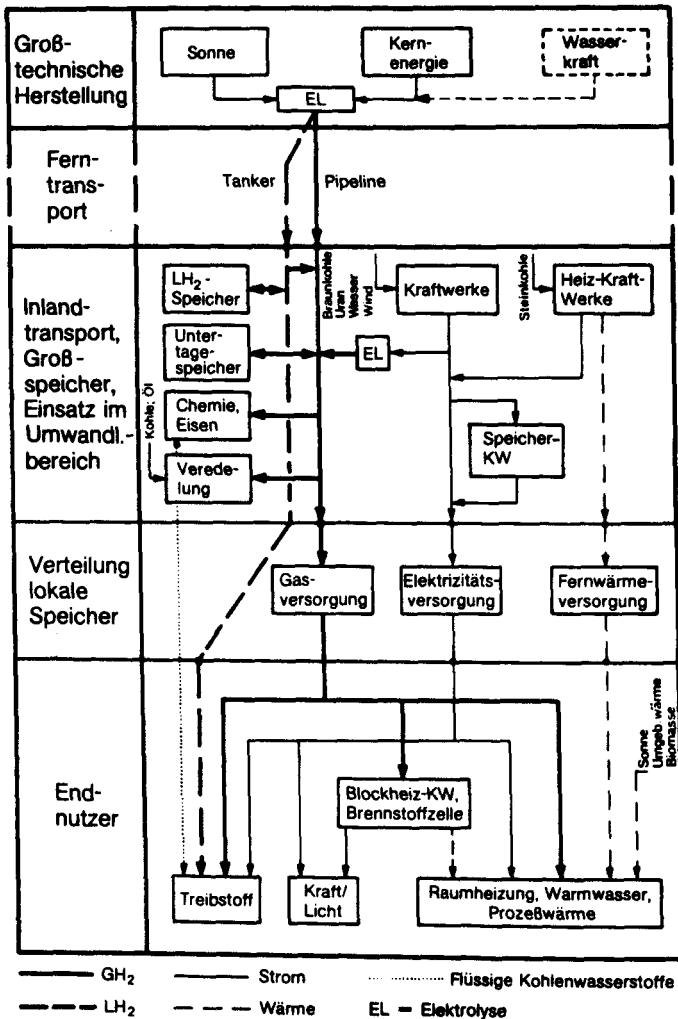


Abb. 3:

Struktur einer überwiegend auf Wasserstoff, Strom und Fernwärme basierenden Energieversorgung der Bundesrepublik Deutschland (nach NITSCH [20]).

lichsten industriellen Zwecke oder zum Antrieb von Kraftfahrzeugen eingesetzt werden soll.

Der Rahmen der industriellen Anwendungs- und Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff kann von den klassischen Verfahren wie beispielsweise die Ammoniaksynthese über Verfahren zur Veredelung von fossilen kohlenstoffhaltigen Rohstoffen bis zu Prozessen im metallurgischen Bereich zur Direktreduktion von Eisenerz gespannt werden [22–24]. Da die Kosten und Preise für fossile Brennstoffe in den letzten Jahren erheblich gestiegen sind und diese Energieträger als immer wertvoller werdende Rohstoffe der Industrie vorbehalten werden müssen, kann sich hier ein großes Anwendungs- und Einsatzpotential für Wasserstoff eröffnen.

Ähnliche Perspektiven eröffnen sich beim Einsatz von Wasserstoff für Antriebszwecke. H_2 -betriebene Verbrennungsmotoren gehen von heutigen Kolbenmotoren aus, die aufgrund der Eigenschaften des Wasserstoffs jedoch speziell angepaßt werden müssen. Wie beispielsweise die Erfahrungen der Fa. Daimler-Benz AG mit einem für Versuchszwecke entwickelten City-Bus mit Wasserstoffantrieb (modifizierter Ottomotor) zeigen oder aus anderen realisierten Beispielen zu ersehen ist, können Kolbenmotore durchaus mit Wasserstoff betrieben werden [25, 26]. Die dazu erforderlichen Änderungen sind technisch machbar, ohne die vorhandene Technologie grundlegend ändern zu müssen. Da H_2 -betriebene Motoren ohne Drosselklappe arbeiten, ist ein höherer Wirkungsgrad als bei Benzinmotoren zu erwarten.

Die konsequente Fortführung und Weiterentwicklung dieser Gedanken und Vorstellungen zur Sonnen-Wasserstoff-Wirtschaft führte in den letzten Jahren zu vertieften Planungen und ersten Prototypanlagen. Die Struktur einer überwiegend auf Wasserstoff, Strom und Fernwärme basierenden Energieversorgung der Bundesrepublik Deutschland zeigt Abb. 3 [20]. In dieser Darstellung – Stand 1981 – spiegeln sich die grundlegenden, von JUSTI angegebenen Komponenten der Sonnen-Wasserstoff-Wirtschaft wider [7, 9]. Prototypen von solarthermischen Kraftwerken, die entweder nach dem solar-tower- oder dem solar-farm-Prinzip arbeiten, befinden sich bereits im Betrieb [27, 28]. Das Konzept einer ausschließlich auf solar-elektrischen (photovoltaischen) Kraftwerken basierenden Wasserstoff-Wirtschaft wird von DAHLBERG beschrieben [29, 30]. Auf weitere Einzelheiten zur Ausgestaltung der Sonnen-Wasserstoff-Wirtschaft soll hier nicht näher eingegangen werden. Stattdessen sei auf die Monographien verwiesen, in denen die Ergebnisse von über Jahre hinweg verfolgten Arbeiten zusammengefaßt sind [12, 16, 17].

4. Untersuchung von Teilproblemen der Sonnen-Wasserstoff-Wirtschaft

Parallel zu den mehr übergeordneten und die Ausgestaltung des Konzepts der Sonnen-Wasserstoff-Wirtschaft betreffenden Arbeiten konzentrierten sich die im Institut für Technische Physik der TU Braunschweig durchgeführten experimentellen Untersuchungen auf wichtige Teilprobleme. In Ergänzung zu den elektrochemischen Arbeiten zur stromliefernden Rekombination von Wasserstoff und Sauerstoff in Niedertemperaturbrennstoffzellen, die EWE umfassend dargestellt hat [31], wurden bei-

spielsweise Untersuchungen zur Herstellung großer Wasserstoffmengen mit Hilfe der Wasserelektrolyse durchgeführt. In Zusammenarbeit mit der Industrie wurden ferner Transport- und Speichermöglichkeiten von großen Wasserstoffmengen diskutiert und erste Planungsvorschläge erstellt. Bei der Nutzung von gasförmigem Wasserstoff für Heizungszwecke standen Arbeiten zur katalytischen Verbrennung im Mittelpunkt des Interesses. Diese Arbeiten sollen nachfolgend kurz umrissen werden.

4.1 Herstellung von Wasserstoff

Zu den Grundlagen der Sonnen-Wasserstoff-Wirtschaft zählt die wirtschaftliche und energetisch möglichst günstige Herstellung von Wasserstoff. Da zukünftig die fossilen Energieträger Erdgas, Erdöl und Kohle als Rohstoffe der Industrie vorbehalten werden müssen, verbleiben zur großtechnischen Bereitstellung der erforderlichen H_2 -Mengen speziell die elektrolytischen Prozesse. Sie nehmen in verfahrenstechnischer und qualitativer Hinsicht eine Sonderstellung ein: Der benötigte Rohstoff Wasser liegt in fast unbegrenzter Menge vor, die Elektrolyseure stellen hinsichtlich Aufbau, Betrieb und Wartung vergleichsweise geringe Anforderungen, und es werden in nur einem einzigen Produktionsschritt hochreiner Wasserstoff und Sauerstoff getrennt vom Elektrolyseur abgegeben.

Als Elektrolyse wird allgemein die elektrochemische Abscheidung oder Zerlegung einer im Elektrolyten befindlichen Substanz bei Stromfluß bezeichnet. Der Stromdurchgang durch die Phasengrenzen Kathode/Elektrolyt bzw. Elektrolyt/Anode ist mit einer Reihe elektrochemischer Reaktionsschritte verknüpft, bei denen im Falle der Wasserelektrolyse das Wasser in seine Bestandteile zerlegt wird. Im alkalischen Elektrolyten setzt sich die vereinfachte Bruttoreaktion $\text{H}_2\text{O} + \text{Energie} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$ aus der kathodischen Reduktion von Wassermolekülen in elektrisch negativ geladene

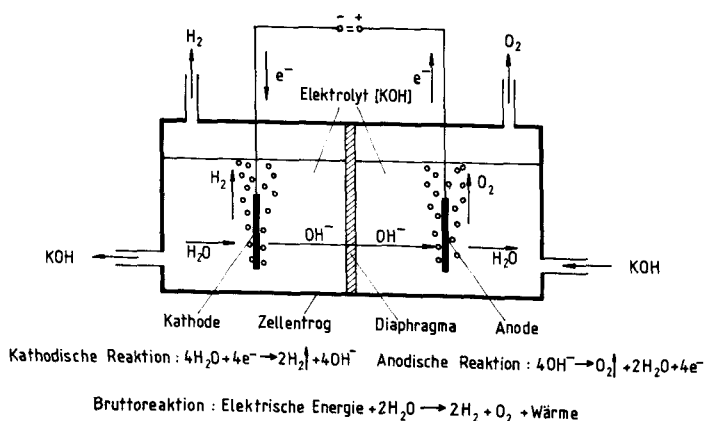


Abb. 4:

Schematischer Aufbau einer alkalischen Wasserelektrolysezelle und vereinfachte Darstellung des Reaktionsablaufs.

Hydroxylionen unter Wasserstoffentwicklung und der anodischen Oxidation von OH^- -Ionen in elektrisch neutrale Wassermoleküle unter Sauerstoffabscheidung zusammen. Der schematische Aufbau einer Elektrolysezelle ist in Abb. 4 dargestellt [32]. Eine großtechnische Wasserelektrolyseanlage setzt sich im wesentlichen aus der Gleichrichteranlage zur Gleichstromerzeugung, dem eigentlichen Zellenblock sowie den erforderlichen Nebenanlagen wie Speisewasser- und Elektrolytaufbereitungseinrichtungen, Gaskühlern und -wäschern, Katalysatoren zur H_2 - und O_2 -Nachreinigung sowie den Trocknungs- und Speichereinrichtungen zusammen.

Wie die genaue Analyse des spezifischen Energieverbrauchs bei der Wasserelektrolyse zeigt, müssen zusätzliche Energieanteile aufgrund von Spannungsverlusten aufgebracht werden, die auf anodischen und kathodischen Polarisierungen sowie auf dem Ohmschen Spannungsabfall im Elektrolyten beruhen [33]. Das Ziel aller Verbesserungen der Wasserelektrolysetechnik muß daher die Verkleinerung der Zellenspannung bzw. des zusätzlichen elektrischen Energieaufwandes sein. Da die elektrolytische Wasserzersetzung die Umkehr der Brennstoffzellenreaktion darstellt, konzentrierten sich die im Institut für Technische Physik durchgeführten Arbeiten darauf, die bei der Untersuchung von alkalischen Niedertemperaturbrennstoffzellen gesammelten Erfahrungen zu nutzen und auf die Elektrolysetechnik zu übertragen. Insbesondere legte es die Struktur der in H_2 - O_2 -Elementen mit Erfolg eingesetzten Elektroden nahe, auch in Elektrolysezellen hochporöse Elektroden zu verwenden.

Die aus der Brennstoffzellentechnik bekannten, durch simultanes Heißpressen hergestellten hochporösen Doppel-Skelett-Katalysator-Elektroden (DSK-Elektroden) bestehen aus einem metallischen, mechanisch sehr stabilen Carbonylnickel-Stütz-

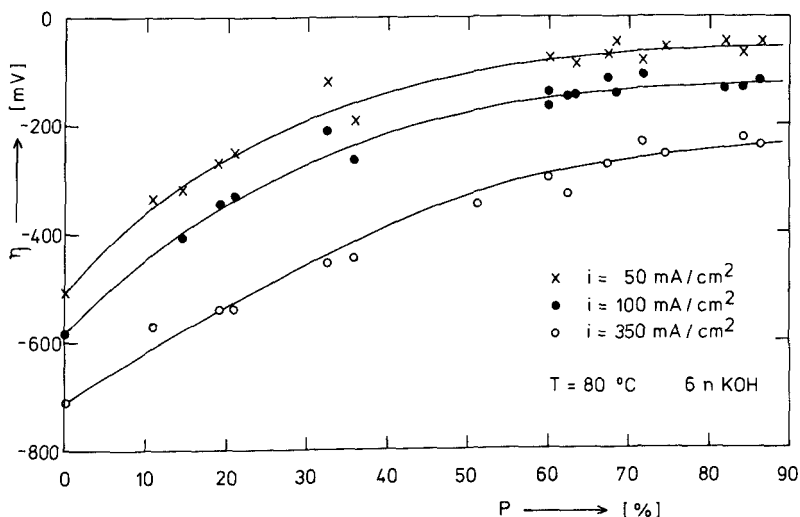


Abb. 5:

Einfluß der Porosität von heißgepreßten Carbonylnickelelektroden auf die sich bei der Wasserstoffabscheidung einstellenden Polarisationen.

gerüst, in das stark fehlgeordnete, hochaktive Katalysatoren eingelagert werden können [34]. Hohe Volumenporositäten werden durch Verwendung von großen, nach dem Pressen wieder herauszulösenden Salzfilleranteilen erzielt. Durch die vergrößerte Elektrodenoberfläche nehmen insbesondere die Durchtrittsüberspannungen in der Phasengrenzfläche zwischen Elektrode und Elektrolyt ab. Diesen Sachverhalt spiegelt Abb. 5 wider, in der die sich in 6 n KOH bei 80°C an Wasserstoff abscheidenden Nickelkathoden einstellenden Polarisierungen über der Elektrodenporosität aufgetragen sind [35]. Die Untersuchung von heißgepreßten Carbonylnickelanoden führt zu ähnlichen Verhältnissen: Bei 80°C und 350 mA/cm² nehmen bei einer Porositätsvergrößerung von 0 auf über 83% die Potentiale in der Größenordnung von mehreren 100 mV ab [36].

Die Leistungsfähigkeit der porösen Anoden und Kathoden kann durch den Zusatz von Katalysatoren, insbesondere von hochaktivem Raney-Nickel, erheblich gesteigert werden [37]. Raney-Nickel (RaNi) ist eine Legierung aus Aluminium, deren Al-Anteil in heißer Kalilauge herausgelöst wird, wobei eine stark fehlgeordnete, schwammartige Nickelstruktur mit hoher innerer Oberfläche und großer Porosität entsteht. Da an den unter Oxidationsbedingungen arbeitenden Anoden größere Überspannungen als an den unter Reduktionsbedingungen arbeitenden Kathoden auftreten, lag das Hauptgewicht der Untersuchungen auf der Entwicklung einer hochporösen, gegenüber dem naszierenden Sauerstoff stabilen O₂-Abscheidungselektrode mit niedrigen Polarisierungen. Als am besten geeignet erwiesen sich dabei 2 mm dicke Nickelelektroden mit Volumenporositäten von etwa 80%, die aus ca. 75 Gew.-% Stützgerüst- und 25 Gew.-% Katalysatoranteil heißgepreßt wurden [36]. Die in Abb. 6 eingezeichneten stationären O₂-Abscheidungskennlinien lassen die unterschiedlichen Einflüsse verschiedener RaNi-Katalysatoren auf die Kinetik der Sauerstoff-Abscheidung erkennen. Die Ver-

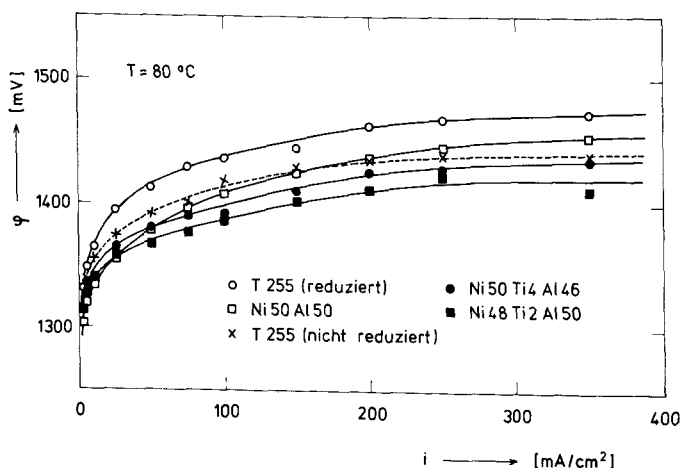


Abb. 6:

Stationäre Sauerstoff-Abscheidungskennlinien von aus Carbonylnickel und verschiedenen Raney-Nickel-Katalysatoren heißgepreßten porösen Elektroden.

wendung von Raney-Nickel mit 2 Gew.-% Titan führte zu den geringsten Überspannungen.

Im Rahmen dieser Untersuchungen stellte sich jedoch die merkliche Oxidation des Nickels zu $\alpha\text{-Ni}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ als nachteilig heraus, da durch dieses auf der Oberfläche der Ni-Körner aufwachsende voluminöse Hydroxidhydrat das Mikroporensystem praktisch vollständig und die größeren Makroporen zum erheblichen Teil verstopft werden. Dieser gravierende Nachteil kann jedoch vermieden werden, wenn auf die Oberfläche der hochporösen Nিকেlelektroden eine dünne NiO-Schicht aufgebracht wird. Nach Untersuchungen von BAUER verhindert eine derartige Schicht auch bei den unter stark oxidativen Bedingungen arbeitenden Anoden die Ausbildung des voluminösen Nickelhydroxidhydrats [38]. Diese Passivschicht zeichnet sich offenbar durch einen kleinen Diffusionskoeffizienten der OH^- - bzw. Ni^{++} -Ionen aus, so daß auch während langer Betriebszeiten die Wanderungen dieser Ionen sehr erschwert, damit die Oxidation des Nickels stark gehemmt und ein Zuwachsen der Poren verhindert wird. Darüberhinaus bietet diese stabile NiO-Schicht den weiteren Vorteil, daß sie die anodische Sauerstoffabscheidung sehr gut katalysiert [39]. Für den Einsatz in alkalischen Wasserelektrolysezellen scheinen daher heißgepreßte Ni-Anoden mit einer dünnen NiO-Passivschicht geeigneter zu sein als mit RaNi-Katalysatoren hergestellte Elektroden.

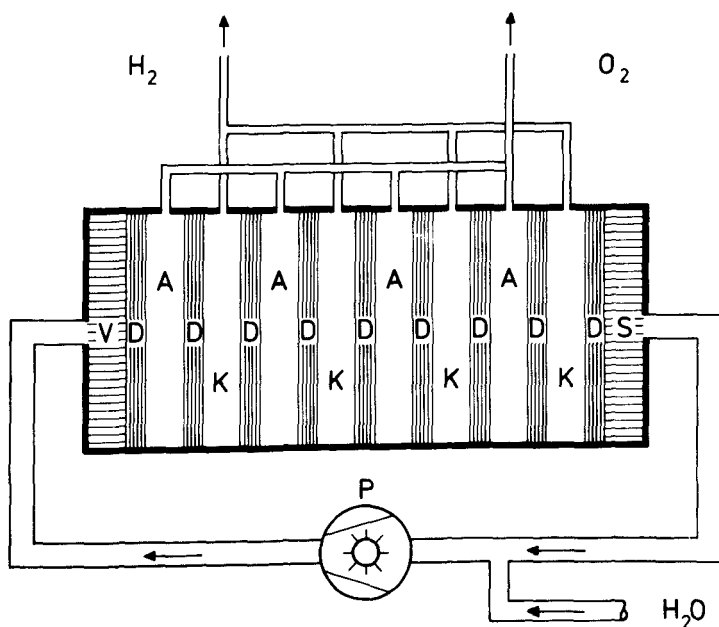


Abb. 7:

Schematischer Aufbau der Eloflux-Wasserelektrolysezelle

(A: Anoden; K: Kathoden; D: Asbestpapierdiaphragmen; V: Elektrolytverteiler; S: Elektrolytsammler; P: Elektrolytpumpe).

Der praktische Einsatz von hochporösen, in ihren elektrochemischen Eigenschaften optimierten Nickelelektroden für die Wasserelektrolyse erfolgte in Eloflux-Zellen [36, 40, 41]. Dieser von WENDTLAND und WINSEL entwickelte Zellentyp basiert auf der Ausnutzung der beiden Porensysteme, die sich in DSK-Elektroden gegenseitig durchdringen [42]. Dabei ist das feinere Porensystem, welches durch die Mikroporosität der Katalysatorkörner bestimmt wird, mit Elektrolyt gefüllt. Das gröbere Porensystem, d. h. die zwickelförmigen Bereiche zwischen den einzelnen Stützgerüst- und Katalysatorkörnern sowie die durch den wieder herausgelösten Salzfiller erzeugten Poren, ist dagegen mit abgeschiedenem Wasserstoff oder Sauerstoff gefüllt. Nach Abb. 7 sind bei dieser Zellenkonstruktion unter Verzicht auf jegliche freie Elektrolyt- oder Gasräume abwechselnd poröse Anoden und Kathoden, die durch feinporige Asbestpapierdiaphragmen voneinander getrennt sind, zu einem kompakten Zellenblock vereinigt. Über grobporige Elektrolytverteiler und -sammler strömt der Elektrolyt axial durch das Zellenpaket. Da die abgeschiedenen Elektrolysegase radial zum Rand hin abgeführt werden, kreuzen sich innerhalb der Elektroden die Gas- und Elektrolytströme.

Die wichtigsten Vorteile dieses Zellentyps sind:

- durch die kompakte Bauweise ist das Zellenvolumen außerordentlich klein und die Auslegung als Druckelektrolysezelle vergleichsweise einfach;
- als Anoden und Kathoden können hochporöse, einfach herzustellende Einschiebtelektroden verwendet werden;

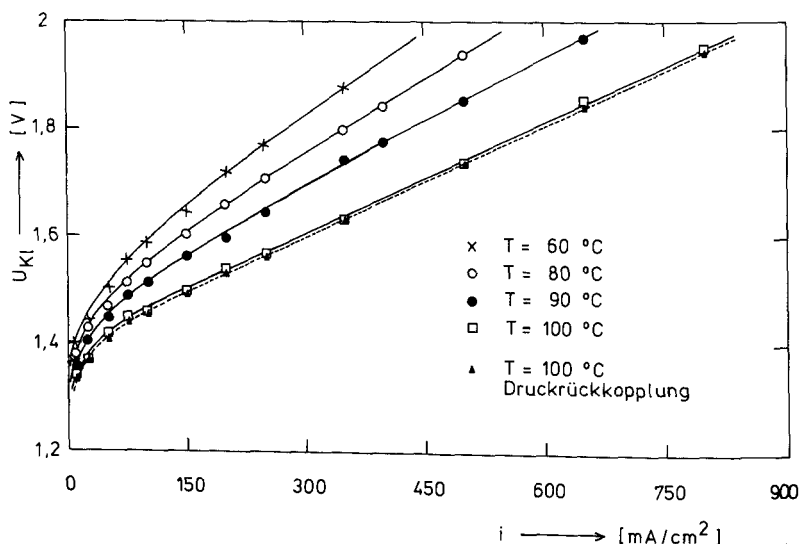


Abb. 8:

Zellenspannung einer Eloflux-Wasserelektrolysezelle ohne (—) und mit (---) Druckrückkopplung in Abhängigkeit von Stromdichte und Temperatur.

- die axiale Elektrolytspülung eliminiert weitgehend die Konzentrationspolarisationen bei hohen Stromdichten.

Das durch die Oxidation des Nickels entstehende voluminöse Hydroxidhydrat, das das Mikroporensystem bei längerem Betrieb fast vollständig verstopft, kann durch die ausschließliche Verwendung von mit passivierenden NiO-Oberflächenschutzschichten versehenen Anoden vermieden werden.

In Abb. 8 sind im Temperaturbereich von 60 bis 100°C gemessene stationäre Strom/Spannungs-Kennlinien ohne und mit auf den Elektrolyten zurückgekoppelten Gasdruck aufgetragen [35, 36]. Danach erfolgt die elektrolytische H₂-Erzeugung mit der Eloflux-Zelle bei vergleichsweise niedrigen Zellenspannungen bzw. ist die elektrolytische H₂-Erzeugung mit einem kleinen Energieaufwand möglich: Bei z. B. 90°C und 200 mA/cm² beträgt die Zellenspannung 1,57 V, während unter gleichen Betriebsbedingungen die Zellenspannung von konventionellen Normaldruckelektrolyseuren zwischen 1,88 und 2,27 V schwankt [43]. Der zugehörige, auf den rein elektrischen Energieaufwand bezogene Wirkungsgrad beträgt etwa 75% und übertrifft damit deutlich die zwischen 60% und 70% liegenden Wirkungsgrade technischer Elektrolyseure.

Während sich bei atmosphärischen Elektrolyseuren der spezifische Energieverbrauch zur Erzeugung von 1 m³ H₂ und 0,5 m³ O₂ auf 4,5–5,45 kWh beläuft, genügen bei der Eloflux-Wasserelektrolysezelle bereits 3,75 kWh, d. h. eine um 17–31% geringere Energiemenge. Insgesamt läßt sich aus den durchgeführten Untersuchungen schließen, daß mit der Eloflux-Anordnung die Wasserelektrolyse mit energetisch sehr günstiger Zellenspannung durchgeführt werden kann. Es muß jedoch darauf geachtet werden, daß die porösen Anoden durch eine stabile und sehr dichte NiO-Schutzschicht passiviert sind und daß eine hinreichende axiale Elektrolytspülung erfolgt.

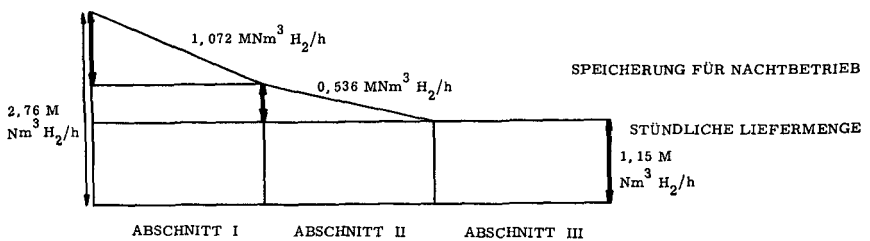
4.2 Transport von Wasserstoff

Nach den bisherigen konzeptionellen Vorstellungen zur Sonnen-Wasserstoff-Wirtschaft soll der in sonnenreichen Regionen elektrolytisch erzeugte Wasserstoff – ggf. auch der Sauerstoff – durch Pipelines bis zu den Bedarfszentren transportiert werden. Wie die langjährigen Erfahrungen mit dem Betrieb der über 200 km langen Wasserstoff-Pipeline im Ruhrgebiet zeigen, stellt der Transport von Wasserstoff durch Pipelines nur geringe technische Probleme [44].

In einem ersten Schritt zur Konkretisierung dieses Vorschlages zum H₂-Transport wurde zusammen mit der Fa. Messer-Griesheim GmbH das Projekt einer Wasserstoff-Pipeline zwischen Gibraltar und Karlsruhe durchgeführt [7, 45]. Ziel dieser Arbeiten war es, den Transport von 10¹⁰ Nm³ H₂/a von Gibraltar nach Karlsruhe zu untersuchen, Lösungsvorschläge für die technische Auslegung dieser Pipeline einschließlich der erforderlichen Kompressor- und Pumpenanlagen zu unterbreiten sowie die Investitions- und Betriebskosten abzuschätzen (1 Nm³ \triangleq 1 m³ unter Normalbedingungen).

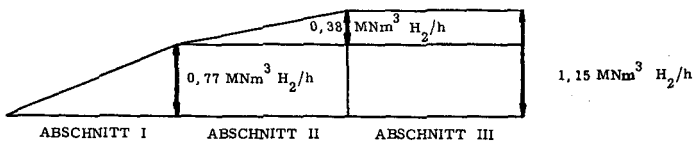
Die projektierte Pipeline, deren Gesamtlänge ca. 2150 km beträgt, ist in etwa drei gleich lange Abschnitte unterteilt, die sich im gewählten Rohrdurchmesser und Betriebsdruck unterscheiden. Bei dem jährlichen Durchsatz von 10¹⁰ Nm³ Wasserstoff

sollen ihr $1,5 \cdot 10^6 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{h}$ bei 8760 Betriebsstunden pro Jahr entnommen werden können. Die geplante Betriebsweise ist schematisch in den Abb. 9 und 10 dargestellt: Abb. 9 zeigt abschnittsweise die erforderlichen Wasserstoffmengen, die während 10 h pro Tag erzeugt und zur Aufrechterhaltung der kontinuierlichen Lieferung von $1,5 \cdot 10^6 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{h}$ durch die Pipeline strömen bzw. für den Nachtbetrieb in ihr gespeichert werden müssen. Abb. 10 gibt die Verhältnisse während des 14-stündigen Nachtbetriebes wieder. Aufgrund dieser Betriebsweise dient die Pipeline nicht nur für reine Transportzwecke, sondern vorteilhafterweise auch zur Speicherung von großen Wasserstoffmengen.



- ABSCHNITT III DURCHFLUSS VON $1,15 \text{ MNm}^3 \text{ H}_2/\text{BETRIEBSSTUNDE}$
- ABSCHNITT II DURCHFLUSS VON $1,15 \text{ MNm}^3 \text{ H}_2/\text{BETRIEBSSTUNDE}$
SPEICHERUNG VON $0,536 \text{ MNm}^3 \text{ H}_2/\text{BETRIEBSSTUNDE}$ (1/3 DES NACHTVERBRAUCHS)
- ABSCHNITT I DURCHFLUSS VON $1,15 \text{ MNm}^3 \text{ H}_2/\text{BETRIEBSSTUNDE}$
DURCHFLUSS VON $0,536 \text{ MNm}^3 \text{ H}_2/\text{BETRIEBSSTUNDE}$ ZUR SPEICHERUNG IN ABSCHNITT II
SPEICHERUNG VON $1,072 \text{ MNm}^3 \text{ H}_2/\text{BETRIEBSSTUNDE}$ (2/3 DES NACHTVERBRAUCHS)

Abb. 9:
H₂-Durchsatz beim Tagesbetrieb der Transport- und Speicherpipeline.



- ABSCHNITT I GESPEICHERTE MENGE : $10,72 \text{ MNm}^3 \text{ H}_2$
ABGABE VON $0,77 \text{ MNm}^3 \text{ H}_2/\text{h}$
- ABSCHNITT II GESPEICHERTE MENGE : $5,36 \text{ MNm}^3 \text{ H}_2$
ABGABE VON $0,38 \text{ MNm}^3 \text{ H}_2/\text{h}$
DURCHFLUSS VON $0,77 \text{ MNm}^3 \text{ H}_2/\text{h}$ AUS ABSCHNITT I
- ABSCHNITT III DURCHFLUSS VON $1,15 \text{ MNm}^3 \text{ H}_2/\text{h}$

Abb. 10:
H₂-Durchsatz beim Nachtbetrieb der Transport- und Speicherpipeline.

Die Baukosten für diese Pipeline errechneten sich auf der damaligen Kostenbasis zu rund 2,5 Mrd. DM, d. h. zu etwa DM 1200/m Rohrleitungslänge. Wenn nur Abschreibung, Reparaturen, Überwachung und Lohnkosten für das Betriebspersonal angesetzt und die sonst in der Wirtschaft üblichen Ansätze für kalkulatorische Zinsen und Rendite außer acht gelassen werden, ergeben sich Durchleitungskosten von ca. 1,8 Pfg./Nm³ Wasserstoff [45].

Weitere Arbeiten im Zusammenhang mit dieser Transport- und Speicherpipeline für gasförmigen Wasserstoff konzentrierten sich auf umfangreiche Rechnungen zur Optimierung der Rohrdurchmesser der einzelnen Abschnitte sowie auf Druckabfallberechnungen [16, 46]. Im Rahmen weiterer Betrachtungen wurde auf die Rückgewinnung eines Teils der erforderlichen Kompressionsenergie bei der Entspannung des angelieferten Wasserstoffs auf den vom Verbraucher gewünschten Druck eingegangen [17, 47].

4.3 Katalytische Verbrennung von Wasserstoff

Ein wesentlicher Anteil des derzeitigen Energieverbrauchs entfällt auf die Bereitstellung von Heiz- und Prozeßwärme. Vom Endenergieverbrauch z.B. in der Bundesrepublik Deutschland entfallen über 70% auf die Bereitstellung von thermischer Energie, die in Haushalt, Kleinverbrauch und Industrie benötigt werden [48]. Da sich bei einem konsequenten Ausbau der Gasversorgung ein großer Anteil dieser Verbraucher langfristig auch mit Wasserstoff versorgen ließe, stellt der Einsatz von Wasserstoff auf dem Wärmemarkt ein wesentliches Potential bei der Einführung einer Wasserstoff-Wirtschaft dar. Die Substitution der fossilen Primärenergieträger Erdgas, Erdöl und Kohle durch gasförmigen Wasserstoff erfordert daher auch die Konzeption und Entwicklung von geeigneten Brenneranlagen, die bezüglich der technischen Erfordernisse einer H₂-Verbrennung ausgelegt sein müssen.

Neben der direkten Verbrennung von Wasserstoff besteht in der katalytischen flammenlosen Verbrennung bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen eine zweite Möglichkeit der Nutzung von H₂ zur Erzeugung von Wärme. Methan, dessen minimale Zündenergie in Luft etwa 0,3 mJ beträgt, kann bei Temperaturen zwischen 300–450°C katalytisch verbrannt werden [22]. Im Gegensatz dazu ist für Wasserstoff mit einer minimalen Zündenergie an Luft von 0,02 mJ die katalytische Verbrennung bei tieferen Temperaturen – etwa im Bereich 150–200°C – möglich. Bei den hierfür zu verwendenden katalytischen Brennern handelt es sich um Vormischbrenner, bei denen Reaktionstemperatur und -geschwindigkeit durch einen Katalysator bestimmt werden. Das Wasserstoff/Luft-Gemisch wird in eine poröse, mit Katalysatormaterial (z.B. Platin oder Palladium) durchsetzte Trägerplatte eingeleitet, wobei die Verbrennung flammenlos bei der Aktivierungstemperatur des Katalysators abläuft. Der wesentliche Unterschied der katalytischen Verbrennung zur direkten Verbrennung (Flammenverbrennung) besteht in der Beeinflussbarkeit der Temperatur im Reaktionsraum. Die eigentliche Verbrennungsreaktion findet auf der Oberfläche von Festkörpern statt, die viel eher in der Lage sind, die entstehende Wärme abzuführen. Mit variablen Wärmeüber-

gängen zum Brennerraum kann die Wärmeabfuhr gesteuert werden, so daß die Temperatur beeinflussbar ist. Aus diesem Grunde werden katalytische H_2 -Brenner als besonders aussichtsreich für den Einsatz bei der Raum- und Gebäudeheizung angesehen [10].

Die wichtigste Eigenschaft von katalytischen Brennern ist die Erzeugung von Wärme bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen. Diese niedrigen Betriebstemperaturen haben zur Folge, daß bei der Verbrennung eines Wasserstoff/Luft-Gemisches praktisch keine oder nur sehr geringe Mengen an giftigen Stickoxiden entstehen. Wegen der weiten Zündgrenzen von Wasserstoff in Luft (4–75 Vol.-% H_2) ist es darüberhinaus möglich, katalytische Brenner derart auszulegen, daß sie nach den Gesichtspunkten einer minimalen Schadstoffabgabe optimiert sind. Bisher diesbezüglich durchgeführte Untersuchungen deuten darauf hin, daß offenbar bei einem Luftanteil von etwa 35 Vol.-% am Wasserstoff/Luft-Gemisch die geringsten Schadstoffanteile emittiert werden. Damit können also große Mengen eines Wasserstoff/Luft-Gemisches katalytisch verbrannt werden, ohne daß ökologisch schädliche Auswirkungen zu befürchten wären. Als Verbrennungsprodukt fällt fast ausschließlich nur Wasserdampf an.

Ein weiterer Vorteil der katalytischen Verbrennung ist dadurch begründet, daß je nach der Nutzungsart der erzeugten Wärme durch unterschiedliche Auslegung des Brenners mit verschiedenen katalytisch aktiven Materialien und unterschiedlich großen Oberflächen verschiedene Temperaturen erreicht und eingehalten werden können. Damit sind sowohl konstruktive als auch anwendungsbezogene Vorteile gegeben: Je nach dem speziellen Anforderungsprofil können katalytische H_2 -Brenner technisch ausgelegt und betrieben werden.

Besonders vorteilhaft wäre ein katalytischer Brenner, wenn die Verbrennungstemperatur unter 100°C liegen bzw. wenn die Katalysatoroberflächen oder andere gekühlte Flächen des Brenners (ggf. spezielle Hilfsflächen) auf Temperaturen unterhalb des Taupunktes der entstehenden Verbrennungsprodukte (Wasserdampf und Stickoxide) gehalten werden können [22]. In diesem Fall würde die maximal mögliche Energie des Wasserstoffs, also sein oberer Heizwert, genutzt und zusammen mit einer dadurch ermöglichten schornsteinlosen Raumheizung ein Verbrennungswirkungsgrad von nahezu 100% erreicht werden können. Als positiver Nebeneffekt eines solchen Heizungssystems wäre eine durch die niedrige Verbrennungstemperatur bedingte Schonung der beheizten Trägerplatte und damit eine Verlängerung ihrer betrieblichen Lebensdauer zu nennen.

Kommerziell gefertigte katalytische Wasserstoffbrenner stehen bisher noch nicht zur Verfügung. Die bisher laufenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind in den letzten Jahren verstärkt fortgeführt und ausgedehnt worden. Mehrere Neuentwicklungen befinden sich bereits in einem fortgeschrittenen Versuchsstadium bzw. werden bereits als Prototyp gebaut.

Für die katalytische Verbrennung von Wasserstoff existieren derzeit zwei Typen von Brennerkonstruktionen für den Betrieb in verschiedenen Temperaturbereichen:

- Der „Niedrig-Temperatur-Typ“ besteht aus porösem Keramikmaterial als Träger, dessen innere Oberfläche mit dem Katalysator beschichtet ist. Mit diesem Typ wer-

den Betriebstemperaturen von ca. 150–250°C bei niedriger H_2 -Verbrennungsrate erreicht.

- Der „Hoch-Temperatur-Typ“ verwendet ein hochtemperaturbeständiges Trägermaterial wie SiC, in das der Katalysator eingelagert ist. Bei den hier erreichten relativ hohen Betriebstemperaturen von etwa 250–500°C wird ein wesentlicher Anteil der Verbrennungsenergie in Form von Wärmestrahlung abgegeben.

Der prinzipielle Aufbau eines katalytischen H_2 -Brenners ist in Abb. 11 wiedergegeben. Über die rückwärtige Zuleitung wird das Wasserstoff/Luft-Gemisch in den Brenner eingeleitet, gelangt dann über Verteiler und Temperaturabschirmung schließlich in die poröse Brennerplatte, um dort katalytisch zu Wasserdampf verbrannt zu werden.

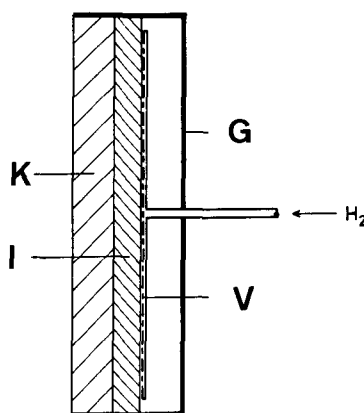


Abb. 11:

Schematischer Aufbau eines katalytischen H_2 -Brenners

(K: Katalysatorplatte; I: thermische Isolation; V: Verteilerplatte; G: Gehäuse).

Im Rahmen ihrer Arbeiten zur katalytischen Verbrennung von Wasserstoff konzentrierten sich JUSTI und SELBACH auf den „Niedrig-Temperatur-Typ“. In Zusammenarbeit mit WINSEL wurde versucht, die in galvanischen Sekundärelementen (z.B. Bleiakkumulator) eingesetzten katalytischen Rekombinatoren für die katalytische H_2 -Verbrennung zu verwenden [49]. Diese Rekombinatoren wurden mit dem Ziel entwickelt, um die aus Bleiakkumulatoren austretenden Knallgasgemische zu rekombinieren. Der Rekombinationskatalysator besteht aus feinverteiltem Palladium auf einem hydrophoben Träger; zum Schutz vor etwaigen Vergiftungen ist die Katalysatormatte mit einer Kohlematte gekoppelt. Die hervorstechendste Eigenschaft dieses Rekombinatoren ist seine Selbstbegrenzung: Ein Überangebot an Knallgas führt nicht zu einem erhöhten Umsatz mit Überhitzung und Explosionen, sondern der Katalysator begrenzt sich selbst bei einer bestimmten Temperatur durch eine flächenhafte Verteilung der Reaktion. Unter Verwendung dieses Rekombinationskatalysators wurde zunächst ein Labormodell eines katalytischen Wasserstoffbrenners für Raumheizungs-

zwecke entwickelt und erprobt. An erste erfolgreich verlaufende Versuche schlossen sich weitere Untersuchungen zur Aufklärung von Problemen an, die beim praktischen Betrieb derartiger Wasserstoffbrenner auftreten. Darüberhinaus wurden Fragestellungen bei der Entwicklung billiger und langlebiger Katalysatormaterialien für die katalytische Verbrennung von Wasserstoff bei niedrigen Temperaturen intensiv diskutiert.

Wesentliche, mit einer Einführung von Wasserstoff zur Wärmeerzeugung verbundene Problemzonen, die im Rahmen weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten noch intensiv zu untersuchen sind, werden in folgenden Punkten gesehen [19]:

- Entwicklung von katalytischen Brennern für einen weiten Mischungsbereich von Methan und Wasserstoff zur Verringerung des Umstellungsaufwandes bei steigendem H_2 -Anteil.
- Untersuchung von Konzepten zur Raumheizung mit katalytischen H_2 -Brennern.
- Definition und Überprüfung von Sicherheitsstandards für Heizungssysteme und Industriefeuerungen mit Wasserstoff.

Das Problem des Überganges von bisherigen Gasheizungssystemen zur Wasserstoffheizung mittels der katalytischen Verbrennung dürfte sich als nicht ganz einfach erweisen. Bevor hier jedoch erste konkrete Aussagen gemacht werden können, müssen die Ergebnisse der laufenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten abgewartet werden.

5. Ausblick

Der Zeitrahmen für die Einführung und den Aufbau einer Wasserstoff-Wirtschaft wird bestimmt von

- der Verfügbarkeit der vorhandenen Primärenergieträger Erdgas, Erdöl, Kohle und Uran;
- dem Umfang von noch erforderlichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten;
- dem eigentlichen Aufbau dieses Energieversorgungssystems.

Nach heutigen Schätzungen dürfte im ersten Jahrhundert nach der Jahrtausendwende mit einer Erschöpfung der Primärenergieträger Erdgas und Erdöl, später auch von Kohle und Uran zu rechnen sein, sofern nicht verstärkte Explorationstätigkeiten, neue Technologien bei der Lagerstättenerschließung bzw. -ausbeutung, Energieeinsparungen oder Möglichkeiten einer rationelleren Energieverwendung die Reichweite der genannten Primärenergieträger vergrößern. Von diesem Zeitpunkt an sollte die Energieversorgung über die Wasserstoff-Wirtschaft sichergestellt werden.

Es verbleiben demnach mehrere Jahrzehnte, die für erforderliche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie den Aufbau der Wasserstoff-Wirtschaft zu nutzen wären. Die bisherigen Energieversorgungsstrukturen können voraussichtlich nicht sehr schnell umgestellt werden. Je kostspieliger ein bestehendes System ist, desto langwieriger und schwieriger dürfte sich auch die Einführung eines ggf. noch teureren Systems gestalten. Aus diesen Gründen hat EDUARD JUSTI, der sich einer engen

Verbindung zwischen Physik und Technik und der daraus resultierenden Verantwortung in besonderem Maße verpflichtet fühlt, immer wieder darauf hingewiesen, daß der noch zur Verfügung stehende Zeitraum genutzt werden muß, um den Übergang auf regenerative bzw. praktisch unerschöpfliche Energiequellen vorzubereiten und den Aufbau eines neuen Energieversorgungssystems zu beginnen. Diese energiepolitische Weitsicht von EDUARD JUSTI findet ihre beste Bestätigung darin, daß das vor wenigen Jahren noch als unrealistisch erscheinende Konzept einer Sonnen-Wasserstoff-Wirtschaft mittlerweile weltweit untersucht wird. Die Option, Wasserstoff als Sekundärenergieträger zu verwenden, ist in den „Energiepolitischen Handlungsempfehlungen“ der Enquete-Kommission „Zukünftige Kernenergie-Politik“ des Deutschen Bundestages enthalten [50]. Auf die Möglichkeit, Sonnenenergie in Form von Wasserstoff aus in südlichen Breitengraden gelegenen Ländern zu importieren, wird dort ausdrücklich hingewiesen.

Literatur

- [1] SASSIN, W.: Scientific American **243** (1980), Nr. 3, S. 106–117.
- [2] HÄFELE, W.: Atomwirtschaft-Atomtechnik **25** (1980), Nr. 8/9, S. 416–421.
- [3] HÄFELE, W. et al.: Energy in a Finite World – A Global Systems Analysis, Ballinger Publishing Company, Cambridge/Mass. (1981).
- [4] JUSTI, E. in: Jahrbuch der Akademie der Wissenschaften und der Literatur Mainz 1955, S. 200–221, F. Steiner Verlag, Wiesbaden (1956).
- [5] JUSTI, E.: Die zukünftige Energieversorgung der Menschheit, Vortragsreihe der Niedersächsischen Landesregierung zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung in Niedersachsen, Heft 16, Verlag Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen (1960).
- [6] JUSTI, E. / KERSTEN, M., in: Proceedings of the Eighth World Petroleum Congress, S. 191 bis 199, Elsevier Publishing Company Ltd., Barking (1971).
- [7] JUSTI, E., in: Akademie der Wissenschaften und der Literatur Mainz 1949–1974, S. 41–53, F. Steiner Verlag, Wiesbaden (1974).
- [8] JUSTI, E., in: Sitzungsberichte und Mitteilungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft, Sonderheft 1: Beiträge zur Energiewirtschaft, S. 63–93, Verlag E. Goltze, Göttingen (1976).
- [9] JUSTI, E.: Leitungsmechanismus und Energieumwandlung in Festkörpern, S. 452–455, Verlag Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen (1965).
- [10] JUSTI, E., in: Bossel, U. (Hrsg.), Tagungsbericht 1. Deutsches Sonnenforum, Hamburg, 26.–28. 9. 1977, Bd. II, S. 551–565, Verlag DGS, München (1977).
- [11] BRENNECKE, P. / EWE, H. / JUSTI, E., in: Selzer, H. et al. (Hrsg.), Tagungsbericht 3. Internationales Sonnenforum, Hamburg, 24.–27. 6. 1980, S. 297–306, DGS-Sonnenenergie Verlags GmbH, München (1980).
- [12] BOCKRIS, J. O'M. / JUSTI, E.: Wasserstoff – Energie für alle Zeiten, U. Pfiemer Verlag, München (1980).
- [13] JUSTI, E.: etz **102** (1981), Nr. 2, S. 68–72.
- [14] BRENNECKE, P. / EWE, E. / JUSTI, E.: Revue Internationale d'Héliotechnique (1981), 2^e Semestre, S. 52–57.
- [15] JUSTI, E., in: Actes de la 19^{ème} Rencontre Internationale de la COMPLES, Jerba, 22.–26. 9. 1980, S. 69–81, Tunis (1982).
- [16] JUSTI, E.: Hidrogeno Solar – Energía para el futuro, Marcombo S.A., Boixareu Editores, Barcelona (1985).

- [17] JUSTI, E.: A Solar-Hydrogen Energy System, Plenum Publishing Corporation, New York (im Erscheinen).
- [18] GOETZBERGER, A. / ZASTROW, A.: Berichte der Fraunhofer-Gesellschaft (1985), Nr. 1, S. 3–10.
- [19] Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (Hrsg.), Wasserstoff als Sekundärenergieträger – Vorschlag für ein Forschungs- und Entwicklungsprogramm, DFVLR-Mitteilung 81–10, Stuttgart (1981).
- [20] NITSCH, J.: DFVLR-Nachrichten (1981), Nr. 34, S. 2–6.
- [21] SEIFRITZ, W.: *Chimia* **28** (1974), Nr. 7, S. 323–340.
- [22] Bundesministerium für Forschung und Technologie (Hrsg.), Einsatzmöglichkeiten neuer Energiesysteme – Teil III: Wasserstoff, Bonn (1975).
- [23] BALTER, J. F. / STOCKER, G. / GOUSTY, Y., in: Commission of the European Communities (Hrsg.), Seminar on Hydrogen as an Energy Vector – Its Production, Use and Transportation, S. 482–505, EUR 6085 DE/EN/FR/IT, Brüssel (1978).
- [24] BRENNKE, P., in: Justi, E., A Solar-Hydrogen Energy System, Plenum Publishing Corporation, New York (im Erscheinen).
- [25] BUCHNER, H. / POVEL, R.: *International Journal of Hydrogen Energy* **7** (1982), Nr. 3, S. 259–266.
- [26] EWE, H., in: Justi, E., A Solar-Hydrogen Energy System, Plenum Publishing Corporation, New York (im Erscheinen).
- [27] PALZ, W. / STRUB, A. / GRETZ, J. / TREIBER, H. / HOFMANN, J., in: Selzer, H. et al. (Hrsg.), Tagungsbericht des 3. Internationalen Sonnenforums, Hamburg, 24.–27. 6. 1980, S. 3–20, DGS-Sonnenenergie Verlags GmbH, München (1980).
- [28] GRASSE, W.: DFVLR-Nachrichten (1981), Nr. 34, S. 6–10.
- [29] DAHLBERG, R.: *Elektronik* **29** (1980), Nr. 24, S. 49–56.
- [30] DAHLBERG, R.: *International Journal of Hydrogen Energy* **7** (1982), Nr. 2, S. 121–142.
- [31] EWE, H.: Entwicklungsarbeiten für Niedertemperatur-Brennstoffzellen im Institut für Technische Physik der TU Braunschweig, in: Sonderdruck der BWG Prof. Justi, S. 31–66.
- [32] BRENNKE, P., in: Bockris, J. O'M. / Justi, E., Wasserstoff – Energie für alle Zeiten, S. 241–266, U. Pfiemer Verlag, München (1980).
- [33] VUILLEUMIER, H. / BRAUN, M.: *Revue Générale de l'Electricité* **85** (1976), Nr. 6, S. 534–536.
- [34] JUSTI, E. / WINSEL, A.: Kalte Verbrennung – Fuel Cells, F. Steiner Verlag, Wiesbaden (1962).
- [35] BRENNKE, P. / EWE, H.: *Chemie-Ingenieur-Technik* **52** (1980), Nr. 5, S. 426–428.
- [36] BRENNKE, P.: Dissertation, TU Braunschweig (1978).
- [37] JUSTI, E. / SCHEIBE, W. / WINSEL, A.: Deutsche Patentschrift, Nr. 1019361 (1954).
- [38] BAUER, M. / EWE, H. / JUSTI, E.: *Energy Conversion* **12** (1972), Nr. 4, S. 149–152.
- [39] BRENNKE, P. / EWE, H. / JUSTI, E.: Deutsche Patentschrift, Nr. 2903407 (1983).
- [40] BRENNKE, P. / EWE, H. / JUSTI, E., in: Derichsweiler, A. / Kringner, H. (Hrsg.), Tagungsbericht 2. Internationales Sonnenforum, Hamburg 12.–14. 7. 1978, Bd. II, S. 247–263, Verlag DGS, München (1978).
- [41] BRENNKE, P. / EWE, H. / JUSTI, E.: *Revue Internationale d'Héliotechnique* (1980), 2^e Semestre, S. 50–54.
- [42] WENDTLAND, R. / WINSEL, A.: Deutsche Patentschrift, Nr. 1496241 (1965).
- [43] Lurgi GmbH (Hrsg.): Lurgi Schnellinformation T 1190/3.76, Frankfurt a. M. (1976).
- [44] ISTING, C. / THIER, B.: *Der Lichtbogen* **24** (1975), Nr. 176, S. 16–20.
- [45] KIPKER, R.: *Chemie-Ingenieur-Technik* **48** (1976), Nr. 2, S. 138–139.
- [46] JUSTI, E. / BRENNKE, P. / KLEINWÄCHTER, J.: *Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft* **32** (1981), S. 153–185.

- [47] BRENNECKE, P. / JUSTI, E. / KLEINWÄCHTER, J. / ROTZOLL, R., in: Hohmann, H. H. et al. (Hrsg.), Tagungsbericht 4. Internationales Sonnenforum, Berlin, 6. –9. 10. 1982, Bd. II, S. 941–960, DGS-Sonnenenergie Verlags GmbH, München (1982).
- [48] Bundesministerium für Wirtschaft (Hrsg.), Energieprogramm der Bundesregierung – Dritte Fortschreibung vom 4. 11. 1981, Bonn (1981).
- [49] JUSTI, E. / SELBACH, H.-J., in: Akademie der Wissenschaften und der Literatur Mainz, Jahrbuch 1981, S. 101, F. Steiner Verlag, Wiesbaden (1982).
- [50] Bericht der Enquete-Kommission „Zukünftige Kernenergie-Politik“, Deutscher Bundestag, Drucksache 8/4341, Bonn (1980).